



Avaliação do Perigo de Queda de Blocos em Rodovias Rockfall Evaluation in Highways

Guilherme José Cunha Gomes¹ & Frederico Garcia Sobreira²

¹*Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Espírito Santo (DER-ES).
Av. Mal. Mascarenhas de Moraes, Ilha de Santa Maria, 29.052-015, Vitória, ES*

²*Universidade Federal de Ouro Preto. Núcleo de Geotecnia (UFOP/NUGEO).
Campus Universitário, s/nº, 35.400-000, Ouro Preto, Minas Gerais*
Emails: guilherme.gomes@der.es.gov.br; sobreira@degeo.ufop.br

Recebido em: 21/02/2012 Aprovado em: 08/03/2013

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2012_2_14_27

Resumo

Taludes rochosos em rodovias são superfícies potencialmente instáveis, que frequentemente condicionam quedas de blocos, afetando a segurança dos usuários de rodovias, a infraestrutura dos transportes e o meio ambiente. O comportamento geológico-geotécnico dos maciços rochosos e as condições geométricas e de trafegabilidade das rodovias são aspectos fundamentais na avaliação do perigo de queda de blocos. Esta pesquisa busca aplicar um método de avaliação do perigo de queda de blocos rochosos em taludes de rodovias, objetivando a classificação e hierarquização dos segmentos rodoviários com base em critérios definidos. Neste contexto, doze taludes rochosos do sistema rodoviário do Espírito Santo foram investigados, a partir de parâmetros, visando à obtenção de um índice para expressar o grau de perigo aos condutores que trafegam pelos trechos, denominado índice de queda de blocos. A efetividade dos parâmetros no método adotado também foi avaliada. Os taludes foram hierarquizados, definindo-se ainda medidas prioritárias para intervenções em cada trecho, de forma a minimizar os problemas causados em cada segmento.

Palavras-chave: queda de blocos; talude; rodovia; avaliação

Abstract

Highway rock slopes are potentially unstable surfaces and as such are susceptible to rockfalls that affect the highway's user safety, transportation infrastructure and surrounding environment. The geomechanical behavior of rock masses and also the geometric and traffic conditions of highways are fundamental aspects of rockfall evaluation. This research presents a case study of rockfall evaluation for slopes bordering highway sections, aiming to classify them and determine a hierarchy for intervention, based on defined criteria. In order to use this approach, field investigations including geomechanical classification of rock mass are necessary. In this context, twelve slope sections containing rock slopes in Espírito Santo's road network were investigated. The slopes were analyzed individually and the influence of each parameter in the global rating was evaluated. Parameter effectiveness in the proposed method was also evaluated. The slopes were classified to define priority measures to minimize roadway problems in each place.

Keywords: rockfall; slope; highway; evaluation

1 Introdução

A malha rodoviária brasileira está construída em um ambiente geológico-geotécnico relativamente heterogêneo, fato que transfere um grande desafio à engenharia de taludes rochosos. No contexto da engenharia rodoviária, taludes rochosos são superfícies potencialmente instáveis que podem afetar os usuários das rodovias, o meio ambiente e a infraestrutura dos transportes. Essas esferas afetadas carecem de ferramentas que retratem, de forma racional, um grau aceitável de perigo de queda de blocos ao longo de taludes de estradas.

Diante da periculosidade do problema e da dificuldade de investigação e análise de centenas de quilômetros de rodovias montanhosas, que requerem controle de queda de blocos, países desenvolvidos trabalharam em sistemas de classificação de taludes que pudessem ser obtidos através de investigações de campo e cálculos simplificados. O objetivo destas classificações é identificar e hierarquizar locais particularmente perigosos, que demandem intervenções urgentes ou estudos detalhados futuros, possibilitando às agências ou departamentos de estradas uma ação direcionada às intervenções nestes locais.

Neste cenário, os métodos de avaliação do perigo de queda de blocos em rodovias são importantes ferramentas de auxílio ao monitoramento de taludes potencialmente instáveis, através de estudos e investigações das características diretamente ligadas ao problema. Este trabalho busca aplicar um método de avaliação do perigo relacionado à queda de blocos rochosos em 12 taludes de rodovias do Estado do Espírito Santo, visando à classificação com base em critérios definidos e a identificação dos pontos mais problemáticos, sugerindo intervenções prioritárias.

2 Queda de Blocos em Rodovias

A queda de blocos rochosos (“rockfall”) corresponde ao destacamento de uma massa de rocha em encosta íngreme ou escarpada (Giani, 1992), existindo pouco ou nenhuma ruptura (deslocamento) por cisalhamento (Hoek & Bray, 1981). Os deslocamentos são muito rápidos, ocorrendo principalmente por queda livre, rolamento ou salto (Ahrendt, 2005). As quedas possuem dimensões geométricas variáveis, podendo ocorrer em forma de cubos, placas, lascas, entre outras (ISRM, 1978; Palmström, 1995).

Segundo Giani (1992), o início do fenômeno de queda de um bloco em um talude rochoso envolve condições iniciais de instabilidade, que causam o movimento de uma massa induzido pela ruptura do talude. A velocidade inicial do movimento de queda depende das condições de instabilidade e do posicionamento do bloco anteriormente à ruptura. De acordo com o autor, os principais modos de indução de instabilidade de taludes são: a pressão neutra nas descontinuidades; terremotos ou vibrações por detonações; pressões devido à formação de gelo nas descontinuidades e escavação.

Ritchie (1963) estudou os diversos fatores que influenciam a trajetória de um bloco rochoso em queda. Alguns deles são o tamanho e o formato do bloco envolvido, a altura e o ângulo do talude, as características da superfície das encostas, o padrão das descontinuidades e o tipo de rocha. O autor desenvolveu um critério prático para dimensionar a largura e a profundidade das áreas de captação de blocos na base dos taludes, a partir da altura e ângulo de inclinação da superfície do talude. A área de captação ou captura de blocos rochosos é uma estrutura em concreto existente entre o limite do pavimento da rodovia e a base do talude, funcionando como local de isolamento dos materiais destacados da faixa de rolamento da pista. O critério de Ritchie tornou-se uma ferramenta prática para dimensionamento dessa estrutura na base de taludes rochosos, sendo utilizada frequentemente por projetistas rodoviários, principalmente na América do Norte, mesmo após mais de quatro décadas de sua elaboração (Pierson *et al.*, 2001). Posteriormente, a Federal Highway Administration (FHWA, 1989), transformou a idéia de Ritchie em um ábaco (Figura 1).

O comportamento geomecânico das encostas é constantemente avaliado pelos geotécnicos para a obtenção de informações sobre a estabilidade dos taludes, a partir do diagnóstico da posição espacial, forma das descontinuidades e material de preenchimento. Essa avaliação pode ser realizada a partir das classificações dos maciços rochosos. Gomes (1991) sustenta a idéia que as classificações geomecânicas são sistemas orientados que visam compartimentar os maciços rochosos em classes a partir de características geomecânicas, atribuindo notas, por meio de diversos parâmetros (geológicos, mecânicos e geotécnicos), de forma a homogeneizar segmentos com o mesmo comportamento.

Dentre as principais classificações geomecânicas elaboradas, as de Bieniawski (1973, 1989) e Romana (1985) serviram de suporte para o

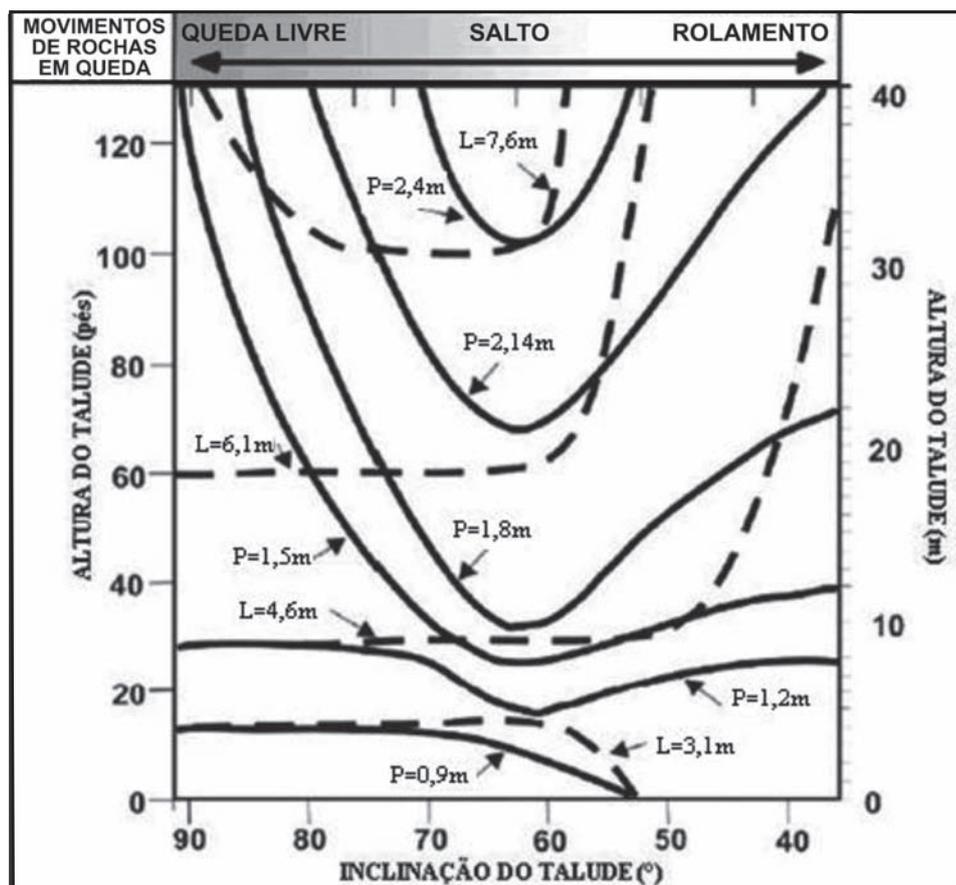


Figura 1 Ábaco de Ritchie (1963) para a determinação da largura (L) e da profundidade (P) da área de captação em função da altura e do ângulo de inclinação do talude (adaptado de FHWA, 1989).

desenvolvimento de classificações aplicáveis a taludes rochosos rodoviários. O RMR (“Rock Mass Rating”) proposto por Bieniawski (1973, 1989) considera seis parâmetros que são utilizados para classificar um maciço rochoso: resistência à compressão uniaxial da rocha intacta; RQD (“rock quality designation”); espaçamento das descontinuidades; condições das descontinuidades; condições de água; e orientação das descontinuidades. O SMR (“Slope Mass Rating”) de Romana (1985) é obtido a partir de um ajuste do RMR desenvolvido por Bieniawski, que é acrescido por um termo fatorial dependente da relação talude – descontinuidade e por um valor referente ao método de escavação.

O tamanho de blocos é um indicador importante para a avaliação do maciço rochoso, porém não é uma tarefa simples, como exemplificado em Gomes *et al.* (2011 a). Esta dimensão é determinada a partir do espaçamento e persistência das descontinuidades, bem como pelo número de famílias que delineiam potenciais blocos (ISRM, 1978). Palmström (1995) afirma que existem inúmeras maneiras de dimensionamento de blocos num maciço rochoso a partir das famílias de descontinuidades.

De acordo com Gomes *et al.* (2011 b), características geométricas e de trafegabilidade de rodovias também devem ser consideradas na avaliação do perigo de queda de blocos. Entre as características, o volume médio diário (VMD) representa o número médio de veículos que percorre uma seção ou trecho de uma rodovia por dia (DNIT, 2006). A velocidade diretriz selecionada para fins de projeto da rodovia representa a maior velocidade com que determinado trecho pode ser percorrido em condições adequadas de segurança, mesmo com o pavimento molhado, sem a influência do tráfego. Outra característica rodoviária, a distância de visibilidade, pode ser entendida como padrão de visibilidade proporcionado ao motorista, de modo que sempre haja tempo para tomada de decisão visando à segurança.

O primeiro inventário de áreas problemáticas quanto às quedas e proposição de hierarquização de taludes foi desenvolvido por Brawner & Wyllie (1975). A partir deste trabalho, classificações de taludes rochosos rodoviários surgiram com o intuito de auxiliar a gestão de áreas críticas nas estradas.

No início da década de 90, baseado nos trabalhos antecedentes, um sistema de classificação de taludes rochosos voltado para rodovias foi desenvolvido por Pierson *et al.* (1990). Denominado “Rockfall Hazard Rating System” (RHRS), o método implantado no Estado de Oregon (EUA) mostrou-se uma importante ferramenta de análise e prevenção do problema de queda de blocos nas estradas. O sistema RHRS é uma ferramenta de gestão para a determinação rápida de taludes rochosos que oferecem perigo aos usuários. As nove categorias do RHRS são enquadradas em quatro pontuações distintas, sendo permitido interpolações. O critério de pontuação aumenta exponencialmente de 3 a 81, possibilitando a distinção de taludes mais problemáticos ou perigosos. As encostas que possuem as maiores pontuações de acordo com o critério necessitam de prioridade na remediação.

Budetta (2004) baseou-se no método RHRS para avaliar a queda de blocos em rodovias italianas. O autor modificou algumas categorias, adaptando-

as ao contexto geológico e rodoviário do País. A principal modificação proposta por Budetta (2004) foi a incorporação do SMR (Romana, 1985) na avaliação geológica dos maciços rochosos.

3 Desenvolvimento do Trabalho

O desenvolvimento deste estudo baseou-se essencialmente no emprego de levantamentos geológico-geotécnicos de taludes rochosos e geométricos e de trafegabilidade de 12 segmentos rodoviários do Estado do Espírito Santo (Figura 2), visando a classificação e hierarquização de trechos com problemas de quedas de blocos. Duas das doze seções estudadas não estão perceptíveis no mapa devido à proximidade, isto é, por causa da escala de visualização.

O método de avaliação da queda de blocos foi então utilizado a partir de dados geológico-geotécnicos obtidos das investigações dos taludes, bem como dados geométricos e de trafegabilidade das seções rodoviárias. Classificações geomecânicas

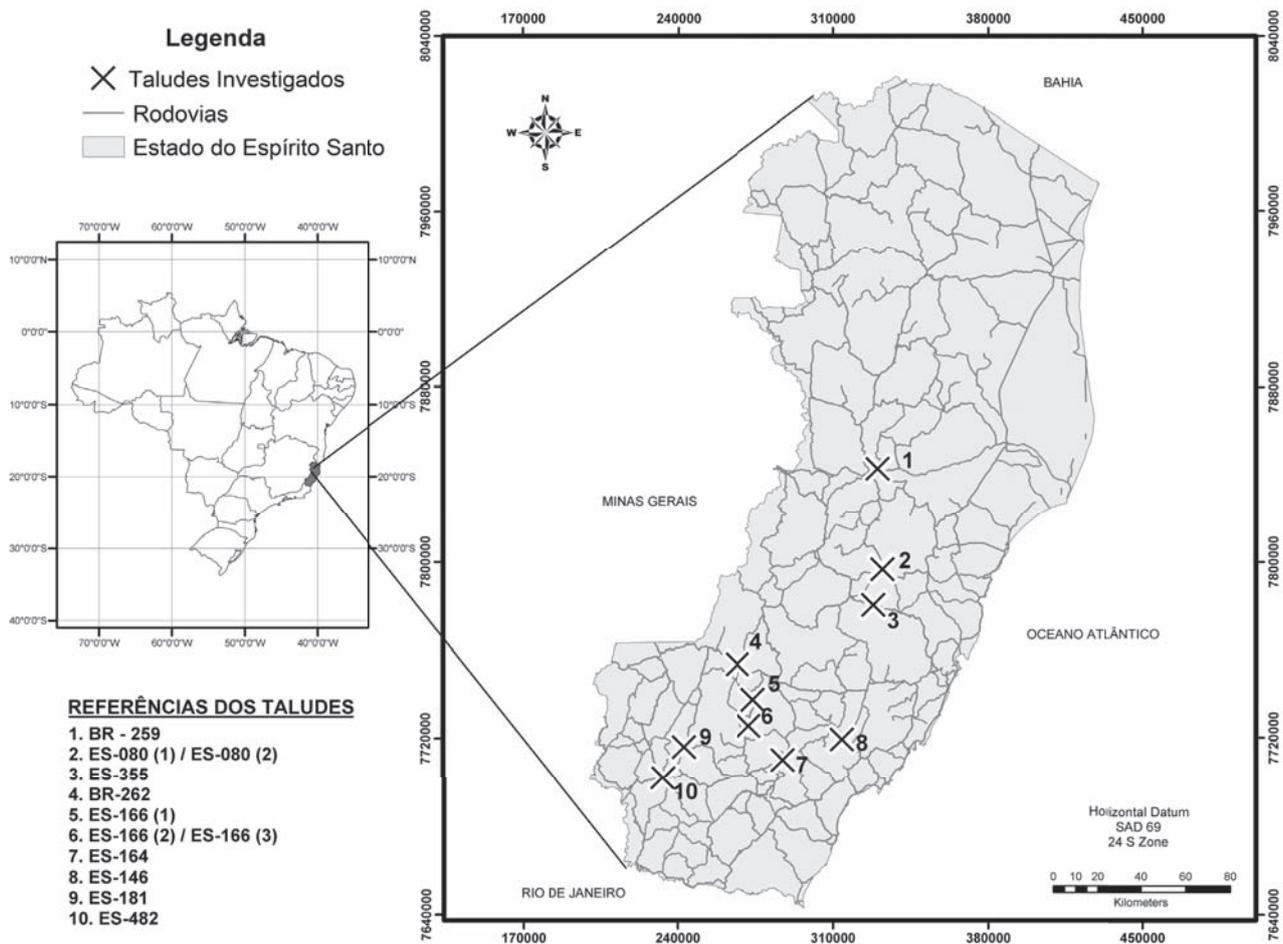


Figura 2 Distribuição dos taludes investigados (Estado do Espírito Santo, Brasil).

de maciços rochosos foram utilizadas para avaliação geotécnica dos taludes, ajustando métodos de avaliação da queda de blocos internacionalmente propostos para o contexto rodoviário brasileiro. Dessa forma, foram definidos taludes com prioridade para intervenção.

Neste método, largura do pavimento, altura e extensão do talude, velocidade diretriz, distância de visibilidade, rampa longitudinal e área de captação de blocos são determinadas para a caracterização das condições de tráfego ao longo das seções rodoviárias e a geometria de cada área estudada.

A caracterização dos maciços rochosos das seções foi obtida através do estudo das estruturas, representadas genericamente pelas descontinuidades do maciço, de acordo com os parâmetros indicados por ISRM (1978), Bieniawski (1973, 1989), Romana (1985), Pierson & van Vickle (1993) e Palmström (1995) para a descrição da condição estrutural dos maciços rochosos.

A caracterização das descontinuidades foi realizada utilizando-se os seguintes dados: orientação, abertura, espaçamento, persistência, rugosidade, alteração das paredes, condições do material de preenchimento, fluxo de água, famílias de descontinuidades e tamanho do bloco.

As informações adquiridas em campo sobre as descontinuidades dos maciços foram tratadas para a obtenção de valores sobre a qualidade geomecânica dos taludes estudados. A aplicação da classificação de Bieniawski (1989) foi realizada a partir dos levantamentos de campo e dados contidos na literatura.

Como os maciços estudados eram compostos por rochas cristalinas (granitóides e gnaisses), foram considerados valores entre 100 e 250 MPa para a resistência da rocha intacta, em conformidade com o observado por Palmström (1995) e Bieniawski (1984) para materiais com semelhantes características. Pode ser ainda acrescentado que não foram coletadas amostras para a realização de ensaios de compressão puntiforme por motivos operacionais. Entretanto, a proposta de ISRM (1978) foi usada e como resultado, as rochas foram consideradas como muito resistentes, requerendo muitos golpes do martelo para serem fraturadas.

Para o índice de qualidade da rocha – RQD: (“rock quality designation”), como não se dispunha de testemunhos de sondagem, foi usada a proposta de Priest & Hudson (1976), que correlaciona o RQD

com o espaçamento das descontinuidades usando a equação a seguir, na qual S representa o espaçamento médio das descontinuidades, em metros.

$$RQD = 110.e^{-0,1/S} [(0,1/S) + 1] \quad (1)$$

Foi obtido o espaçamento médio das famílias de descontinuidades em cada talude. O padrão das descontinuidades, que envolve características de abertura, persistência, rugosidade, alteração das paredes e condições do material de preenchimento de cada setor, foi quantificado pela média das grandezas analisadas. Para a influência da água subterrânea observou-se visualmente, durante um ano, preferencialmente no período chuvoso, considerando o estado seco, úmido, transpiração, gotejamento, filete e jorro.

A orientação das descontinuidades com relação aos taludes por trecho, de Bieniawski, não foi considerado na classificação RMR, conforme propõe Romana (1985) em seu modelo SMR. Neste caso, as atitudes das descontinuidades e dos taludes foram registradas para a aplicação do SMR.

4. Metodologia para Avaliação dos Taludes

Foram adotados oito índices para a avaliação do perigo de queda de blocos em taludes rochosos rodoviários, conforme apresentado na Tabela 1. Cada índice recebeu uma pontuação cujos valores máximos e mínimos são, respectivamente 3 e 81, sendo os menores valores correspondentes às melhores condições de segurança na estrada.

Pierson & van Vickle (1993) propuseram um método prático em campo, que possibilita o cálculo da altura média dos taludes. Diante da dificuldade de acesso ao topo da maioria dos taludes, a altura dos cortes (H) foi obtida com o auxílio de trena e clinômetro, a partir da relação trigonométrica da Equação 2.

$$H = X * \tan \alpha + AC \quad (2)$$

Onde X é a distância em metros do ponto de medição (extremidade do pavimento); α é o ângulo medido pelo clinômetro e AC é a altura do clinômetro. Os valores 6, 12, 18 e 24 metros apresentados na Tabela 1 foram definidos de acordo com a variação da altura dos taludes estudados, objetivando estabelecer um indicador adequado para esta categoria.

Parâmetro	Critérios e Pontuação			
	3 pontos	9 pontos	27 pontos	81 pontos
Altura do talude	6,0 m	12,0 m	18,0 m	24,0 m
Efetividade da área de captura	Boa captura + conformidade com o ábaco de Ritchie + proteção	Captura moderada + conformidade com o ábaco de Ritchie	Captura limitada + não-conformidade com o ábaco de Ritchie	Sem captura
Risco médio ao veículo	25% do tempo	50% do tempo	75% do tempo	100% do tempo
Porcentagem da distância de visibilidade	100% Distância de visibilidade adequada	75% Distância de visibilidade moderada	50% Distância de visibilidade limitada	25% Distância de visibilidade muito limitada
Largura do pavimento	13,2 m	10,8 m	8,4 m	6,0 m
Dimensão do bloco	0,30 m	0,60 m	0,90 m	1,2 m
Condição climática	Baixa precipitação média anual < 1.150 mm	Precipitação média anual moderada 1.150 – 1.450 mm	Precipitação média anual grande 1.450 – 1.750 mm	Alta precipitação média anual > 1.750 mm
Característica geológica (SMR)	80	70	60	50

Tabela 1 Parâmetros, critérios e pontuação utilizada na avaliação de queda de blocos.

O parâmetro efetividade da área de captação mede a eficiência da estrutura em concreto em prevenir que um dado bloco em queda possa atingir o pavimento (Ritchie, 1963). Esta característica das seções rodoviárias foi pontuada a partir da proposta de Budetta (2004), que modificou a avaliação qualitativa de Pierson & van Vickle (1993), ao incrementar aspectos geométricos pioneiros de Ritchie (1963).

Segundo Pierson & van Vickle (1993), o risco médio ao veículo (RV) mede a porcentagem de tempo de veículos presentes na zona de perigo de queda de blocos. A porcentagem é obtida através da Equação (3). O significado do risco ao veículo é similar ao adotado no RHRS.

$$RV = \frac{VDM \times CC}{VD} \quad (3)$$

Onde VDM é o tráfego médio diário (carros/h); CC é o comprimento do corte (km) e VD é a velocidade diretriz (km/h). RV é determinado em termos de porcentagem. Neste caso, quanto menor a porcentagem de veículos em zonas de quedas de blocos, menor será o índice considerado para este parâmetro.

A porcentagem da distância de visibilidade (DV) é usada para determinar o comprimento da rodovia que o motorista possui para tomar uma decisão instantânea. Esta categoria é considerada como crítica quando obstáculos na rodovia são de difícil percepção, ou quando uma manobra inesperada é requerida (Pierson & van Vickle, 1993). A porcentagem da distância de visibilidade é um parâmetro importante na avaliação do perigo de queda de blocos, estando intimamente relacionado com a probabilidade da ocorrência de colisão do automóvel com qualquer objeto presente na pista. O cálculo baseia-se na relação entre as distâncias de visibilidade real (DVR) e a de projeto (DVP), medidas em metros (Equação 4).

$$DV = \frac{DVR}{DVP} \times 100\% \quad (4)$$

DVP, em projetos rodoviários, é função da velocidade diretriz, do atrito entre o pneu e a superfície asfáltica e do greide ou rampa. DVR é obtida em campo, variando a cada metro da rodovia. Na maioria das vezes, por motivos operacionais diversos, envolvendo recursos técnico-financeiros,

determinados trechos rodoviários são construídos sem considerarem a distância de visibilidade ideal ou de projeto. Este fato é perceptível em rodovias que transpõem trechos montanhosos ou sinuosos. Por isso, DVR difere de DVP em muitos segmentos.

O parâmetro largura do pavimento representa a extensão da faixa pavimentada, incluindo o acostamento, medida perpendicularmente à linha central da rodovia. Representa o espaço disponível para o motorista efetuar uma manobra. A maioria dos métodos de avaliação do perigo de queda de blocos em rodovias, que surgiram com base na proposta de Pierson *et al* (1990), manteve a largura do pavimento como categoria essencial da pontuação das seções por considerarem este aspecto geométrico importante para a segurança rodoviária.

Nos taludes investigados, frequentemente menos de 3 famílias de descontinuidades foram identificadas, fato que tornou conveniente a utilização do volume do bloco equivalente proposto por Palmström (1995), conforme Equação 5. Esta relação determina o volume dos blocos (V_b) a partir do contador volumétrico de juntas (J_v) e do fator de forma dos blocos (β), que é função da maior e menor variação do espaçamento entre as fraturas (S_{\max} e S_{\min}) e do índice referente ao número de famílias de descontinuidades (n_j).

$$V_b = \beta \times J_v^{-3} \quad (5)$$

$$\beta = 20 + 7(S_{\max} / S_{\min})(3 / n_j) \quad (6)$$

Onde $n_j = 3,0$ para 3 famílias de descontinuidades; $n_j = 2,5$ para 2 famílias e descontinuidades aleatórias; $n_j = 2,0$ para 2 famílias de descontinuidades; $n_j = 1,5$ para 1 família e descontinuidades aleatórias; $n_j = 1,0$ para 1 única família de descontinuidade.

O índice J_v , de acordo com Palmström (1995), equivale ao número de descontinuidades em um volume unitário do maciço rochoso. Após o cálculo de V_b , utilizou-se a proposta de Budetta (2004), procedendo-se o cálculo da dimensão ou tamanho do bloco (Db), medido em metros:

$$Db = \sqrt[3]{V_b} \quad (7)$$

Diversos métodos de avaliação de perigo de queda de blocos em taludes rochosos rodoviários, basicamente aqueles adotados em países

desenvolvidos, utilizam combinações entre o período que contém água no talude ou neve. Como no sudeste brasileiro a presença de neve seria um fato raro e como a condição de água no talude já é abordada na classificação SMR, optou-se por pontuar este parâmetro em função da precipitação pluviométrica média anual incidente sobre os pontos estudados. O fator climático de maior influência nos taludes brasileiros é a precipitação pluviométrica, na qual a água, ao percolar pelas descontinuidades, promove a redução da resistência ao cisalhamento do maciço (Bieniawski, 1984; Palmström, 1995), com o incremento da poropressão nas fraturas. Como este aspecto já estaria sendo contemplado na classificação RMR com maior detalhamento, procurou-se adotar a proposta de Budetta (2004), que utilizou valores de precipitação pluviométrica das regiões nas quais os maciços rochosos estariam inseridos. Portanto, os valores de precipitação foram obtidos das séries históricas. Baixa precipitação anual (< 1.100 mm) representam pontos de menor influência da água no talude. Por outro lado, precipitações altas (> 1.750 mm) representam maior contribuição da água para a instabilidade do talude.

Devido às características geotécnicas dos taludes, as características geológicas utilizadas por Pierson & van Vickle (1993) não foram utilizadas. O método qualitativo desses autores é mais bem aplicado a regiões com grande variação na estrutura litológica (Gomes & Sobreira, 2008).

A característica geológica dos taludes foi avaliada de acordo com o SMR (Romana, 1985). Budetta (2004) propôs a incorporação do SMR, cujo valor é inversamente proporcional à pontuação de Pierson *et al.* (1990). Os valores de SMR foram ajustados para fornecer um melhor entendimento sobre o comportamento mecânico de cada talude. Valores de SMR menores que 50 podem ser considerados críticos, tendo-se assim um valor alto para o parâmetro característica geológica.

A pontuação dos parâmetros é exponencial, de acordo com a proposta de Pierson *et al.* (1990). Taludes com elevada pontuação possuem maior perigo de queda de blocos e necessitam prioridade para intervenções. Todos os parâmetros, exceto a efetividade da área de captação, podem ser colocados sob a forma de equação, de acordo com Ritchie (1963), ISRM (1978), Romana (1985); Bieniawski (1989), Pierson & van Vickle (1993), Palmström (1995), Budetta (2004), DNIT (2006). As equações utilizadas para cálculo dos parâmetros e a simbologia adotada são apresentados na Tabela 2.

Parâmetro	Símbolo	Equação
Altura do talude (H)	I_{AT}	$I_{AT} = e^{0,1831.H}$
Efetividade da área de captação	I_{AC}	-
Risco médio ao veículo (RV)	I_{RV}	$I_{RV} = e^{0,0439.RV}$
Porcentagem da distância de visibilidade (DV)	I_{DV}	$I_{DV} = 243e^{-0,0439.DV}$
Largura do pavimento (LP)	I_{LP}	$I_{LP} = 1262,7e^{-0,4578.LP}$
Dimensão do bloco (Db)	I_{DB}	$I_{DB} = e^{3,662.Db}$
Condições climáticas (P)	I_{CC}	$I_{CC} = 0,0048e^{0,0054.P}$
Característica geológica (SMR)	I_{CG}	$I_{CG} = 243e^{-0,055.SMR}$

Tabela 2 Símbolos e equações usadas para cada parâmetro.

Após a atribuição dos pontos a todas as oito categorias, os valores foram somados visando a obtenção de um único índice ao talude, denominado índice de queda de blocos (I_{QB}), determinado pela equação:

$$I_{QB} = I_{AT} + I_{AC} + I_{RV} + I_{DV} + I_{LP} + I_{DB} + I_{CC} + 2I_{CG} \quad (8)$$

Onde I_{AT} = parâmetro altura do talude; I_{AC} = parâmetro efetividade da área de captação; I_{RV} = parâmetro risco médio ao veículo; I_{DV} = parâmetro porcentagem da distância de visibilidade; I_{LP} = parâmetro largura do pavimento; I_{DB} = parâmetro dimensão do bloco; I_{CC} = parâmetro condição climática; I_{CG} = parâmetro característica geológica. I_{CG} ganhou maior peso entre os demais parâmetros por ser considerada a categoria com maior influência nos processos de instabilidade quanto às quedas. O fator 2 foi utilizado como forma de realce à característica geomecânica após a atribuição do índice SMR.

Outros métodos de classificação geotécnica de taludes poderiam ser utilizados na avaliação do perigo de queda de blocos em rodovias, desde que retratem o modelo estrutural e as condições de ruptura do maciço. Métodos difundidos na geologia de engenharia, como o RMR e o SMR podem

ser desmembrados, filtrados e reajustados para condições geomecânicas peculiares, adequando-os às características desejadas.

5. Resultados e Discussões

Os taludes selecionados para o estudo estão localizados em diferentes áreas para englobar todos os aspectos envolvidos na presente análise. Foram escolhidos locais com diferenças nas condições de tráfego, rampas, geometria, velocidade diretriz, entre outros aspectos intrínsecos aos projetos rodoviários, uma vez que as características geológicas das áreas investigadas não variaram significativamente. Dos 12 taludes selecionados, 2 encontram-se em rodovias federais, onde ocorre tráfego intenso de veículos.

Cada talude foi avaliado, permitindo o entendimento dos pontos mais problemáticos por parâmetro. Os gráficos na Figura 3 apresentam a relação entre os índices obtidos e os parâmetros analisados.

A Figura 3 (h) mostra a relação entre o índice I_{CG} proposto neste trabalho e o valor do SMR, bem como a distribuição dos valores obtidos para cada talude. Nota-se que, a partir da visualização do gráfico apresentado, a pontuação I_{CG} é inversamente

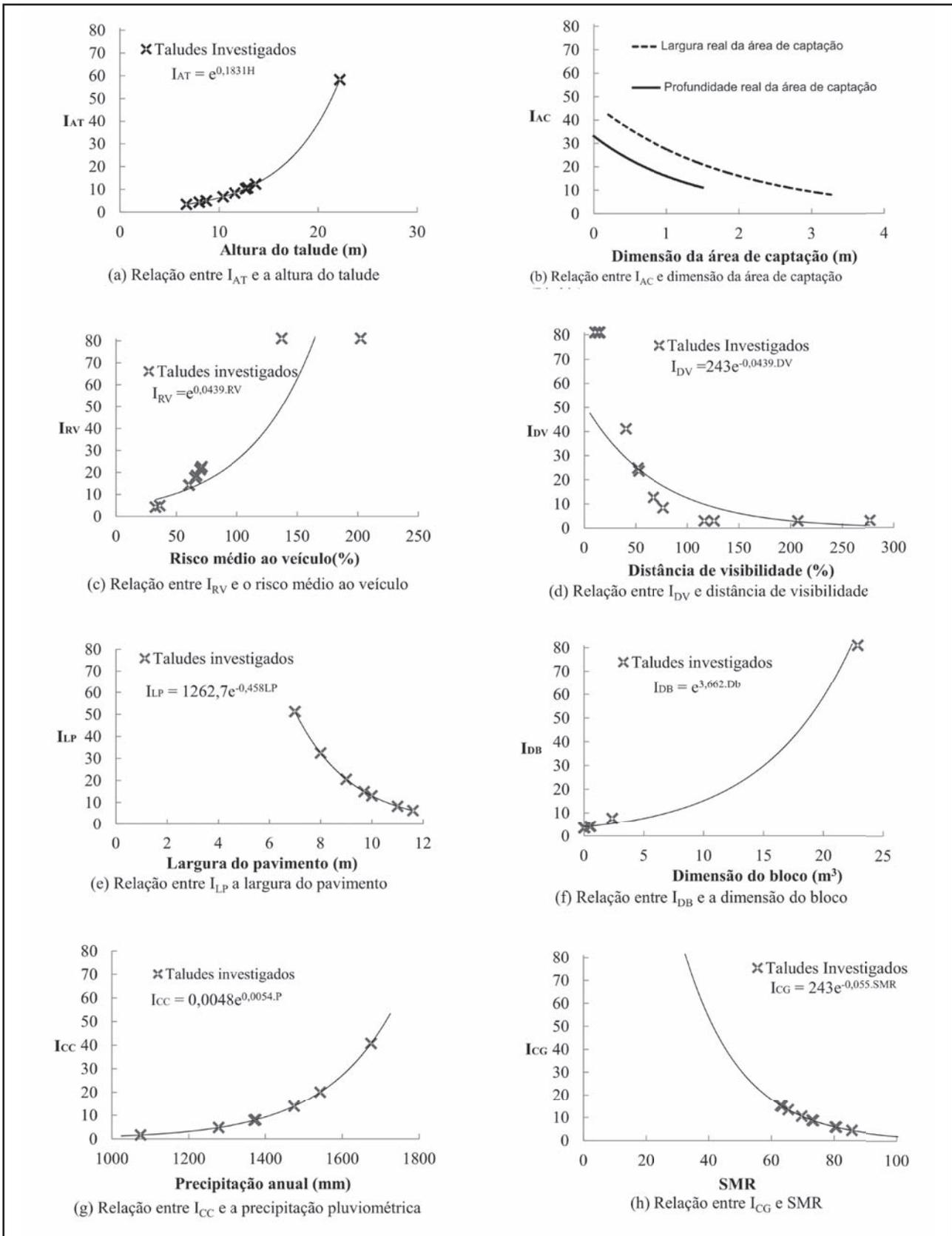


Figura 3 Relação entre os índices obtidos e os oito parâmetros adotados na investigação dos taludes. Os menores valores dos índices correspondem às melhores condições segurança.

proporcional ao índice SMR. Também é possível observar que valores de SMR acima de 60 resultam em baixos valores de I_{CG} . Portanto, um talude rochoso necessita de um baixo valor de SMR para representar uma influência significativa no I_{CG} proposto por Budetta (2004). Por outro lado, se I_{CG} é multiplicado por 2, a característica geológica possuirá uma maior contribuição na determinação do I_{QB} .

A Tabela 3 apresenta resumo dos valores dos índices obtidos e a pontuação total de cada talude. Os taludes mais problemáticos quanto ao perigo de queda de blocos possuem maiores valores de I_{QB} .

Devido aos menores valores de SMR (I_{CG} alto), observa-se que quatro taludes podem ser considerados menos estáveis: ES-080 (1), ES-146, ES-164 e BR-259. Conforme previamente informado, a distinção entre os valores dos índices da característica geológica somente foi possível graças ao uso do SMR, que é mais sensível a mudanças em relação à proposta inicial do RHRS para este parâmetro. A pontuação do método RHRS original foi modificada devido a dois aspectos básicos: sua avaliação ser meramente qualitativa e devido à dificuldade de distinção dos maciços rochosos estudados. Gomes & Sobreira (2008) detalharam esta discussão.

Conforme pode ser visto na Tabela 3, o talude ES-164 foi considerado o mais crítico quanto ao perigo de quedas, recebendo o maior I_{QB} . Além do fator geométrico da rodovia, com ausência de área de captação de blocos na base do talude, fatores geotécnicos foram decisivos para enquadrá-lo numa situação crítica.

O talude ES-164 possui um padrão de descontinuidades que propicia o descalçamento da base, favorecendo a instabilidade dos blocos sobrejacentes. A orientação de 30° da família de descontinuidades principais, oriundas do bandamento do gnaiss, mergulham favoravelmente à face do talude. No entanto, algumas atitudes das descontinuidades, com mergulho mais suave, somadas ao clima com alta precipitação pluviométrica e intenso intemperismo atuante, criam condições favoráveis ao início do processo de queda diante da falta de suporte. Este padrão de descontinuidades torna-se relevante devido à ausência de área de captação neste segmento da rodovia, já que qualquer queda de bloco tende a alcançar o pavimento.

Um problema enfrentado neste trabalho, que também é obstáculo de grande parte das investigações geotécnicas, é a dificuldade de se expressar a qualidade de um maciço com um único índice devido à variabilidade das estruturas presentes, materiais, etc. Os taludes estudados apresentaram-se heterogêneos, possuindo comportamentos distintos em alguns locais. Por isso, em diversas oportunidades, necessitou-se representar a qualidade global do maciço ou, em alguns casos, o pior cenário visualizado.

Devido à ausência de cultura de implantação de áreas de captação dos blocos na base de taludes rodoviários brasileiros, a maioria das áreas de captação não foram dimensionadas adequadamente. Com relação à profundidade das estruturas, apenas as rodovias federais atingiram valores próximos ao ábaco de Ritchie (1963).

Talude	I_{AT}	I_{AC}	I_{RV}	I_{DV}	I_{LP}	I_{DB}	I_{CC}	I_{CG}	I_{QB}
ES - 080 (1)	3,4	27,0	4,2	12,7	51,2	18,2	8,0	18,5	143,2
ES - 080 (2)	12,3	27,0	4,2	81,0	51,2	20,1	8,0	3,0	206,8
ES - 146	8,4	9,0	18,6	23,6	20,5	81,0	20,0	19,2	200,3
ES - 164	58,3	81,0	22,6	24,8	20,5	3,0	41,0	14,8	266,0
ES - 166 (1)	4,9	27,0	17,6	41,1	8,2	3,0	8,0	3,0	112,8
ES - 166 (2)	5,7	27,0	14,1	8,4	8,2	3,0	8,0	3,8	78,2
ES - 166 (3)	6,5	27,0	21,9	3,0	8,2	10,5	8,0	5,3	90,4
ES - 181	4,3	27,0	4,9	3,0	14,9	81,0	8,0	3,0	146,1
ES - 355	10,2	27,0	21,2	81,0	51,2	3,0	8,0	6,1	207,7
ES - 482	6,7	27,0	14,3	81,0	32,4	3,7	5,0	6,4	176,5
BR - 259	4,9	9,0	81,0	3,0	6,2	3,9	3,0	18,4	129,4
BR - 262	10,6	9,0	81,0	3,0	13,0	81,0	14,0	9,2	220,8

Tabela 3 Valores dos índices para cada talude.

No talude ES-146, a presença de água em abundância no talude, inclusive em períodos de seca, e grandes volumes de blocos presentes, podem gerar problemas caso as rupturas atinjam o pavimento (Figura 4 a). Na base do talude ES-355, diversos blocos foram observados na área de captação, fato que pode ser um indicativo de um histórico de quedas no local (Figura 4 b). Neste mesmo talude, a geometria desfavorável da rodovia contribuiu para o aumento do I_{DV} .

A Tabela 3 também apresenta outros taludes com elevado I_{QB} . O talude ES-080 (2) possui boas propriedades geotécnicas, mas apresenta alto valor de I_{QB} relacionado à inadequada distância de visibilidade do usuário e características geométricas desfavoráveis.

A dimensão média dos blocos em cada talude foi sintetizada na Tabela 4. O tamanho do bloco, I_{DB} , apesar de ser uma estimativa, expressou o perigo da ruptura de blocos grandes no talude BR-262. Este talude destaca-se negativamente como o trecho de maiores problemas de volumes, devido ao espaçamento maior entre as descontinuidades da única família identificada. No caso dos demais taludes, as fraturas menos espaçadas e o maior número de famílias delimitam menores volumes de blocos, consequentemente a pontuação do índice I_{DB} decresce.

Talude	Volume do bloco (m3)	Descrição (Palmström, 1995)
ES – 080 (1)	0,496	Blocos grandes
ES – 080 (2)	0,550	Blocos grandes
ES – 146	2,358	Blocos grandes
ES – 164	0,023	Blocos de tamanho médio
ES – 166 (1)	0,002	Blocos de tamanho pequeno
ES – 166 (2)	0,026	Blocos de tamanho médio
ES – 166 (3)	0,266	Blocos grandes
ES – 181	2,358	Blocos grandes
ES – 355	0,002	Blocos de tamanho pequeno
ES – 482	0,045	Blocos de tamanho médio
BR – 259	0,052	Blocos de tamanho médio
BR – 262	22,867	Blocos muito grandes

Tabela 4 Valores obtidos para a dimensão dos blocos e terminologia adotada.

A determinação do volume dos blocos nos taludes foi a tarefa mais árdua durante os levantamentos em campo. Houve dificuldade na identificação de algumas famílias de descontinuidades em virtude das fraturas causadas durante a escavação dos maciços. Isto influencia a determinação do espaçamento entre as descontinuidades e do formato dos blocos. Entretanto, relações empíricas foram utilizadas visando o cálculo da dimensão média dos blocos

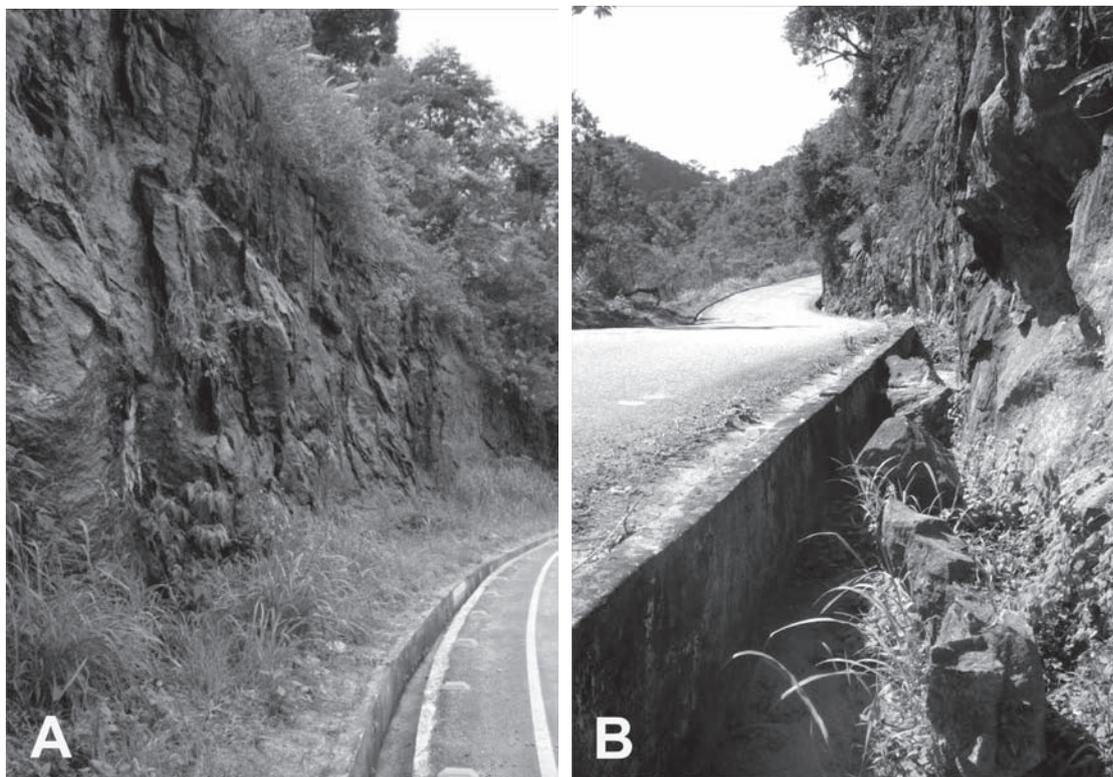


Figura 4
 A-Talude ES-146 onde a presença de água é constante mesmo em períodos secos.
 B - Blocos observados na área de captação do Talude ES-355 indicam problemas de queda constantes.

nos maciços, pois esta característica é fundamental em avaliações de queda de blocos.

6 Proposição de Intervenções Prioritárias

O resultado da classificação apresentada nesta pesquisa pode ser utilizado como ferramenta de gestão rodoviária. Os maiores valores obtidos correspondem aos taludes rodoviários que necessitam de intervenção com alta prioridade. A classificação proposta permite ainda designar, de forma prática, as características das rodovias que necessitam ser incrementadas ou remediadas visando à segurança dos usuários. O resumo dos aspectos mais críticos obtidos, além das propostas de intervenção em cada segmento rodoviário com perigo de queda de blocos é apresentado na Tabela 5.

As medidas a serem tomadas foram sucintamente propostas como forma de minimizar os principais problemas observados em campo e confirmados após a determinação dos valores para cada parâmetro. As medidas sugeridas abrangem:

- Remoção ou fixação de blocos instáveis;
- Melhorias geométricas no traçado e na plataforma;
- Sinalização vertical nas proximidades dos taludes;
- Elaboração e execução de projeto de estabilização do maciço rochoso;
- Análise cinemática da estabilidade de taludes.

Talude	Parâmetros críticos	Intervenções prioritárias
ES – 080 (1)	▪ Característica geológica	Remoção ou estabilização de blocos instáveis
ES – 080 (2)	▪ Distância de visibilidade	Melhorias geométricas da rodovia
ES – 146	▪ Característica geológica ▪ Risco médio ao veículo ▪ Condição climática	Remoção ou estabilização de blocos instáveis. Sinalização vertical próxima ao talude
ES – 164	▪ Característica geológica ▪ Altura do talude ▪ Área de captação ▪ Condição climática	Execução de projeto de estabilização do maciço. Melhorias geométricas da rodovia vertical. Sinalização vertical próxima ao talude.
ES – 166 (1)	▪ Área de captação	Melhorias geométricas da rodovia vertical
ES – 166 (2)	▪ Área de captação	Melhorias geométricas da rodovia vertical
ES – 166 (3)	▪ Área de captação	Melhorias geométricas da rodovia vertical
ES – 181	▪ Característica geológica	Remoção ou estabilização de blocos instáveis
ES – 355	▪ Distância de visibilidade	Melhorias geométricas da rodovia vertical
ES – 482	▪ Distância de visibilidade	Melhorias geométricas da rodovia vertical
BR – 259	▪ Característica geológica	Remoção ou estabilização de blocos instáveis
BR – 262	▪ Dimensão do bloco	Melhorias geométricas da rodovia
ES – 355	▪ Distância de visibilidade	Melhorias geométricas da rodovia vertical
ES – 482	▪ Distância de visibilidade	Análises cinemática da estabilidade do talude
BR – 259	▪ Característica geológica	Remoção ou estabilização de blocos instáveis
BR – 262	▪ Dimensão do bloco	Melhorias geométricas da rodovia

Tabela 5
 Resumo dos aspectos mais críticos e propostas de intervenção prioritárias.

7 Conclusões

O método de avaliação proposto nesta pesquisa é uma ferramenta preliminar para identificação de pontos de perigo relacionados à queda de blocos em rodovias. O levantamento realizado permite que diagnósticos geotécnicos específicos sejam elaborados. O esforço deste trabalho corresponde a um primeiro passo para a correção de problemas em taludes de rodovias capixabas causados pelas quedas de blocos.

A determinação das características geométricas e de trafegabilidade dos trechos rodoviários em estudo é fundamental na avaliação dos perigos relacionados à queda de blocos rochosos. Taludes rochosos em rodovias com elevado VDM ou distância de visibilidade comprometida pela geometria sinuosa devem ser cuidadosamente estudados pelo poder público, visando intervenções adequadas nestes locais. Este é o caso de taludes estudados nas rodovias ES-080, ES-355 e ES-482, que carecem de melhorias geométricas visando adequar uma distância de visibilidade segura aos usuários.

O método utilizado nesta pesquisa representou satisfatoriamente as características dos taludes quanto ao problema de queda de blocos. A hierarquização dos taludes equivale aproximadamente às condições visualizadas em campo. As adaptações realizadas visaram adequar critérios usados internacionalmente às características geotécnicas e rodoviárias brasileiras. Além disso, as adequações aos métodos existentes contribuíram para eliminar a subjetividade de determinados parâmetros.

Os taludes investigados estão situados num mesmo ambiente geológico e climático. Isto foi fundamental para a viabilidade da aplicação do método de avaliação do perigo de queda de blocos proposto nesta pesquisa. Mesmo não existindo metodologia específica neste âmbito sendo utilizada no Brasil, métodos de avaliação do perigo voltados ao estudo da queda de blocos, podem ser adequados em função dos aspectos geológico-geotécnicos e climáticos presentes na região. Entretanto, características geométricas e de trafegabilidade da rodovia são parâmetros essenciais nestas análises, devendo sempre ser considerados.

Com a posse da lista dos taludes problemáticos nas rodovias, cabe ao poder público o gerenciamento das informações, de modo que durante os serviços de reabilitação ou restauração viária, sejam orçados os custos das obras de melhorias nos locais.

8 Agradecimentos

Agradecemos ao Núcleo de Geotecnia da Universidade Federal de Ouro Preto (NUGEO) e ao Departamento de Estradas de Rodagem do Estado do Espírito Santo (DER-ES), o apoio emprestado para o desenvolvimento deste estudo. Os autores são gratos também ao CNPq pelo suporte financeiro.

9 Referências

- Ahrendt, A. 2005. *Movimentos da massa gravitacionais – proposta de um sistema de previsão: aplicação na área urbana de Campos do Jordão – SP*. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 360 p.
- Bieniawski, Z.T. 1973. Engineering classification of jointed rock masses. *Trans. S. Afr. Inst. Civ. Eng.*, 15(12): 355-3344.
- Bieniawski, Z. T. 1984. *Rock Mechanics Design in Mining and Tunneling*, AA.Balkema, Boston, 1984.
- Bieniawski, Z.T. 1989. *Engineering Rock Mass Classifications*, Wiley, New York.
- Brawner, C.O. & Wyllie, D.C. 1975. Rock slope stability on railway projects. *Proc. Am. Railway Engng Assoc.*, Regional Meeting, Vancouver, BC.
- Budetta, P. 2004. Assessment of rockfall risk along roads. *Natural Hazard and Earth System Sciences*, 4(1):71-81.
- DNIT - Departamento Nacional de Infra-estrutura de Transportes .2006. *Manual de estudos de tráfego*. Rio de Janeiro, 384 p. (IPR. Publ., 723).
- FHWA - Federal Highway Administration. 1989. Rock Slopes: Design, Excavation, Stabilization. *Publication No. FHWA-TS-89-045*, Turner-Fairbanks Highway Research Center, McLean, VA.
- Giani, G.P. 1992. *Rock Slope Stability Analysis*. A.A. Balkema Publishers, Rotterdam, Netherlands.
- Gomes, G.J.C. & Sobreira, F.G. 2008. Caracterização geomecânica de maciços rochosos em taludes rodoviários do espírito santo, com ênfase na avaliação do risco de queda de blocos. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL*, 12, Ipojuca, Pe. *Anais. ABGE*, v. CD ROM.
- Gomes, G.J.C.; Sobreira, F.G. & Lana, M.S. 2011 a. Determinação do volume de blocos em taludes rochosos para emprego na engenharia rodoviária. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL*, 13, São Paulo - SP. *Anais. ABGE*, v. CD ROM.
- Gomes, G.J.C.; Sobreira, F.G. & Lana, M.S. 2011 b. Relação entre características rodoviárias de projeto e o perigo de queda de blocos em taludes rochosos. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA DE ENGENHARIA E AMBIENTAL*, 13, São Paulo - SP. *Anais... ABGE*, v. CD ROM.
- Gomes, R.C. 1991. Classificações geomecânicas de maciços rochosos. *Apostila da Escola de Engenharia de São Carlos*, Universidade de São Paulo, 37p.
- Hoek, E. & Bray, J.W. 1981. *Rock Slope Engineering* 3rd ed. IMM, London, p. 1-358.
- ISRM - International Society of Rock Mechanics. 1978. Suggested methods for the quantitative description in rock masses. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech.*

- Abstr. 15, (6): p. 319-368.*
- Palmström, A. 1995. *RMi – a rock mass characterization system for rock engineering purposes*. PhD thesis, Oslo University, Norway, 400p.
- Pierson, L.A.; Davis, S.A. & Van Vickle, R. .1990. Rockfall Hazard Rating System – Implementation Manual, Federal Highway Administration (FHWA), *Report FHWA-OR-EG-90-01*, FHWA, U.S. Dep. of Transp.
- Pierson, L.A. & Van Vickle, R. 1993. Rockfall Hazard Rating System, *Transportation Research Record N° 1343*, National Research Board, Washington, D.C., p 6-19.
- Pierson, L.A.; Gullixson, C.F. & Chassie, R.G. 2001. Rock Fall Catchment Area Design Guide Final Report. SPR-3(032). *Technical Report Form DOTF 1700.7 (8-72)*, Oregon, US.
- Priest, S.D. & Hudson, J.A. 1976. Discontinuity spacing in rock. *International journal of rock mechanics, mining science & geomechanics*, cap. 13, p. 134-153.
- Ritchie, A.M. 1963. Evaluation of rockfall and its control. *U.S. Department of Commerce, Bureau of Public Roads, and the Washington State Highway Commission*.
- Romana, M. 1985. New adjustment ratings for application of Bieniawski classification to slopes. *In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON THE ROLE OF ROCK MECHANICS, Zacatecas*, p. 49-53.